

◀ “973”计划专题 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2013.04.008

基于统一强度理论的牙齿侵入井底岩石的机理分析

李 玮¹, 闫 铁¹, 陈世春², 丛长江³

(1. 东北石油大学石油工程学院, 黑龙江大庆 163318; 2. 中国石油渤海钻探工程有限公司塔里木第四勘探公司, 新疆库尔勒 841000; 3. 中国石油渤海钻探工程有限公司塔里木钻井分公司, 新疆库尔勒 841000)

摘要:为了弄清深部地层复杂钻进条件下的牙轮钻头破岩机理,研究了牙轮钻头牙齿侵入井底岩石问题。在考虑井底压力的条件下,基于统一强度理论对牙齿侵入岩石的力学过程进行了分析,建立了含有统一强度参数的井底岩石侵入方程,并给出了不受轴向载荷、侵入深度和刃尖角影响的侵入系数。该方程考虑中间应力对井底岩石侵入系数的影响,在中间主剪应力的效应系数为0时,方程计算结果与Mohr-Coulomb强度理论所得结果完全相同。根据侵入方程,分析了内摩擦角、液柱压力、孔隙压力和刃尖角对侵入系数的影响。结果表明,侵入系数随中间主剪应力的效应系数的增大而增大,随内摩擦角和刃尖角的增大呈指数增大,随液柱压力的增大呈线性增大,随孔隙压力的增大呈线性减小。研究结果为牙轮钻头的现场应用提供了理论指导。

关键词:统一强度理论 钻头牙齿 牙轮钻头 侵入系数

中图分类号: TE21 文献标识码: A 文章编号: 1001-0890(2013)04-0032-05

Mechanism Analysis of Tooth Sink into Rock Based on Unified Strength Theory

Li Wei¹, Yan Tie¹, Chen Shichun², Cong Changjiang³

(1. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang, 163318, China; 2. Tarim No. 4 Exploration Company, Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., CNPC, Korla, Xinjiang, 841000, China; 3. Tarim Drilling Branch Company, Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., CNPC, Korla, Xinjiang, 841000, China)

Abstract: In order to figure out the rock breaking mechanism in complex formation conditions, the teeth cutting into rock in bottom was studied. Considering the condition of the bottom hole pressure, based on unified strength theory, the mechanical process of teeth cutting into rock was analyzed, bottomhole rock sinking equation with unified strength parameters was established and sinking coefficient without the impact of axial load, invasion depth and bit angle have been worked out. The equation considers the impact of intermediate stress on sinking coefficient. The results of the equation and Mohr-Coulomb strength theory are identical when the effect coefficient of intermediate principal shear stress equals 0. The impact of angle of internal friction, fluid column pressure, pore pressure and bit tooth angle on sinking coefficient were analyzed based on sinking equation. The results show that the sinking coefficient increases with the increase of effect coefficient of intermediate principal shear stress, increases exponentially with the increase of angle of internal friction and bit tooth angle, increases linearly with the increase of fluid column pressure, and decreases linearly with the increase of pore pressure. The analysis of rock breaking mechanism of teeth can provide further theory guidance for cone bit onsite application.

Key words: unified strength theory; bit tooth; roller bit; sinking coefficient

牙轮钻头牙齿在钻压作用下冲击侵入井底岩石,是牙轮钻头破岩机理的基本特征之一^[1-4]。在上覆地层压力、水平应力、孔隙压力和钻井液柱压力等多个压力作用下,井底岩石的物理力学性质发生明显变化,牙轮钻头牙齿侵入井底岩石的机理尚不十分清楚^[5-8]。

目前,国内外主要应用单剪强度理论(Mohr-

收稿日期:2013-03-10;改回日期:2013-06-21。

作者简介:李玮(1978—),男,吉林榆树人,2003年毕业于大庆石油学院石油工程专业,2010年获东北石油大学油气井工程专业博士学位,副教授,主要从事钻井工艺、岩石力学和高效破岩等方面的研究。

联系方式:(0459)6503643,cyping@sina.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“深井复杂地层破岩机理与高效破岩方法”(编号:2010CB226703),国家自然科学基金项目“钻头谐振激励下岩石的响应机制及破碎机理研究”(编号:51274072)和国家科技重大专项“碳酸盐岩、火成岩及酸性气藏高效安全钻井技术”(编号:2011ZX05021-002)部分研究内容。

Coulomb 准则)分析室内常压条件下牙齿侵入岩石的过程,缺少井底高压条件下牙齿的侵入岩石过程分析^[2,9-10]。Mohr-Coulomb 准则忽略了中间主应力的影响,导致井底岩石侵入深度计算结果偏离实际数值。俞茂宏从 20 世纪 60 年代开始系统研究强度理论,并最终提出了新的统一强度理论^[11-12],统一强度理论涵盖了现有的单剪强度理论和双剪强度理论,形成一套完整的理论体系,并在国内外有许多成功的应用实例^[13-15]。笔者应用统一强度理论研究牙齿侵入井底岩石问题,丰富了机械破岩理论,推动了深部地层复杂钻进条件下牙轮钻头破岩机理研究。

1 统一强度理论的 Mohr-Coulomb 形式

1.1 统一强度理论

俞茂宏^[12]基于双剪单元,建立了新的适用于岩土材料的统一强度理论。其定义为:当作用于双剪单元体上的 2 个较大剪应力及其面上的正应力影响

$$F = \begin{cases} \sigma_1 - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1+b} \frac{1+\sin\phi_0}{1-\sin\phi_0} = \frac{2c_0\cos\phi_0}{1-\sin\phi_0} & \left(\sigma_2 \leqslant \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\sin\phi_0 \right) \\ \frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1+b} - \sigma_3 \frac{1+\sin\phi_0}{1-\sin\phi_0} = \frac{2c_0\cos\phi_0}{1-\sin\phi_0} & \left(\sigma_2 > \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\sin\phi_0 \right) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 Mohr-Coulomb 形式

引入系数 m ,令

$$\sigma_2 = \frac{m}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (5)$$

将式(5)带入到式(4),整理得:

$$\begin{cases} \sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3)\sin\phi_1 + 2c_0\cos\phi_1 & (m \leqslant 1) \\ \sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3)\sin\phi_2 + 2c_0\cos\phi_2 & (m > 1) \end{cases} \quad (6)$$

其中 $\sin\phi_1 = \frac{b(1-m) + (2+b+bm)\sin\phi_0}{2+b+b\sin\phi_0}$ (7)

$$c_1 = \frac{2(1+b)c_0\cos\phi_0}{(2+b+b\sin\phi_0)\cos\phi_1} \quad (8)$$

$$\sin\phi_2 = \frac{b(m-1) + (2+b+bm)\sin\phi_0}{2+b-b\sin\phi_0} \quad (9)$$

$$c_2 = \frac{2(1+b)c_0\cos\phi_0}{(2+b-b\sin\phi_0)\cos\phi_2} \quad (10)$$

式(6)为在考虑中间剪应力对岩石强度影响的基础上,推导得到的形式上与 Mohr-Coulomb 强度准则一致的统一强度理论公式。

函数达到某一极限值时,材料开始发生破坏。统一强度理论主应力形式的表达式为:

$$F = \begin{cases} \sigma_1 - \frac{a(b\sigma_2 + \sigma_3)}{1+b} = \sigma_t & \left(\sigma_2 \leqslant \frac{\sigma_1 + a\sigma_3}{1+a} \right) \\ \frac{\sigma_1 + b\sigma_2}{1+b} - a\sigma_3 = \sigma_t & \left(\sigma_2 > \frac{\sigma_1 + a\sigma_3}{1+a} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: F 为主应力, MPa; σ_t 为法向第一主应力, MPa; σ_2 为法向第二主应力, MPa; σ_3 为法向第三主应力, MPa; b 为中间主剪应力效应系数; a 为岩石拉压强度比; σ_t 为单轴抗拉强度, MPa。

α 和 σ_t 与 Mohr-Coulomb 试验测定的强度指标内聚力 c_0 和内摩擦角 ϕ_0 之间的关系为:

$$\alpha = \frac{1 + \sin\phi_0}{1 - \sin\phi_0} \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{2c_0\cos\phi_0}{1 - \sin\phi_0} \quad (3)$$

式中: c_0 为岩石内聚力, MPa; ϕ_0 为岩石内摩擦角, rad。

将式(2)、式(3)带入式(1),得到用岩石强度参数表示的主应力表达式为:

2 牙齿侵入井底岩石的侵入方程

2.1 牙齿侵入井底岩石的力学分析

钻井工程中牙轮钻头的牙齿在钻压作用下侵入岩石的过程,可以简化为图 1。

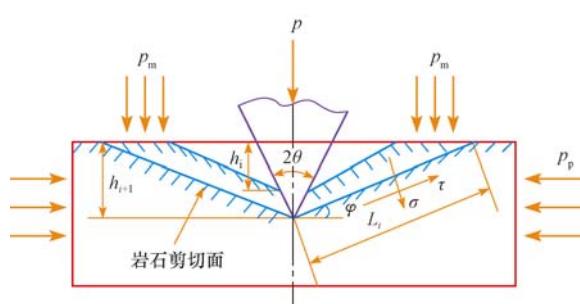


图 1 单齿侵入井底岩石的受力分析

Fig. 1 Force analysis of single-tooth cutting into rock

牙齿刃面在岩石剪切面形成的法向应力 σ' 和剪切应力 τ' 为:

$$\sigma' = \frac{p_{i+1}\sin\varphi}{2h_{i+1}\sin\theta}\sin(\varphi + \theta) \quad (11)$$

$$\tau' = \frac{p_{i+1} \sin \varphi}{2h_{i+1} \sin \theta} \cos(\varphi + \theta) \quad (12)$$

式中: 2θ 为刃尖角, rad; p_{i+1} 为牙齿第 $i+1$ 次跃进时刃面上的线载荷, N/m; h_{i+1} 为岩石第 $i+1$ 次跃进的侵入深度, m; φ 为剪切破坏面与井底平面夹角, rad。

井底各种压力在岩石剪切破坏面上产生的法向应力 σ'' 和剪切应力 τ'' 为:

$$\sigma'' = \frac{(\sigma_{\text{Hh}} + p_m)}{2} - \frac{(\sigma_{\text{Hh}} - p_m)}{2} \cos 2\varphi - p_p \quad (13)$$

$$\tau'' = \frac{(\sigma_{\text{Hh}} - p_m)}{2} \sin 2\varphi \quad (14)$$

式中: σ_{Hh} 为水平地应力, MPa; p_m 为钻井液柱压力, MPa; p_p 为孔隙压力, MPa。

井底岩石剪切破坏面上的总法向应力 σ 和总剪切应力 τ 分别为:

$$\sigma = \sigma' + \sigma'' \quad (15)$$

$$\tau = \tau' + \tau'' \quad (16)$$

2.2 侵入方程

由式(6)可知, 在 $\sigma - \tau$ 平面坐标系中 Mohr-

$$\frac{p_{i+1}}{h_{i+1}} = \frac{4c_1 \sin \theta \cos \phi_1 - (\sigma_{\text{Hh}} - p_m) \sin 2\theta + (2\sigma_{\text{Hh}} + 2p_m - 4p_p) \sin \theta \sin \phi_1}{1 - \sin(\theta + \phi_1)} \equiv K \quad (m \leq 1) \quad (20)$$

式中: K 为井底条件下的侵入系数, Pa。

式(20)表明, 在地层水平应力、液柱压力和孔隙压力不变的情况下, 牙齿每次跃进时的载荷和侵入

$$K = \frac{4c_2 \sin \theta \cos \phi_2 - (\sigma_{\text{Hh}} - p_m) \sin 2\theta + (2\sigma_{\text{Hh}} + 2p_m - 4p_p) \sin \theta \sin \phi_2}{1 - \sin(\theta + \phi_2)} \quad (m > 1) \quad (21)$$

式(20)和式(21)为井底条件下牙齿侵入岩石的侵入方程。侵入系数不受轴向载荷、侵入深度等参数的影响, 是描述井底岩石抗侵入能力的重要的常数。

3 试验及结果分析

3.1 试验装置

试验装置为自主研发的钻头破岩模拟及分析系统(见图2), 可以研究在不同钻压、不同钻速条件下牙轮、PDC钻头的冲击、侵入、切削等机械破岩机理, 为优化设计钻头及其选型提供依据。装置的钻压0~30 kN, 转速0~500 r/min, 钻孔深度0~400 mm, 钻头尺寸0~100 mm。

试验包括常温常压下和围压下的牙齿侵入试验。牙齿采用楔形齿, 刃尖角分为10°、15°、20°等3种。油气井工程中砂岩为普遍钻遇地层, 所以选用砂岩试样。其物理力学参数为: 密度为2.54 g/cm³,

Coulomb强度准则的数学表达式为:

$$\tau - \sigma \tan \phi_1 = c_1 \quad (m \leq 1) \quad (17)$$

将式(15)、式(16)带入式(17), 整理得:

$$\begin{aligned} \tau - \sigma \tan \phi_1 &= \frac{p_{i+1}}{2h_{i+1}} \frac{\sin \varphi \cos(\varphi + \theta + \phi_1)}{\sin \theta \cos \phi_1} + \\ &\quad \frac{(\sigma_{\text{Hh}} - p_m)}{2} (\sin 2\varphi + \cos 2\varphi \tan \phi_1) - \\ &\quad \left(\frac{\sigma_{\text{Hh}} + p_m}{2} - p_p \right) \tan \phi_1 \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)中 $\tau - \sigma \tan \phi_1$ 是 φ 的函数。对式(18)求 φ 的一次导数等于零, 可得:

$$\varphi = \frac{\pi}{4} - \frac{\theta + \phi_1}{2} \quad (19)$$

此时, $\tau - \sigma \tan \phi_1$ 的值最大。分析式(19)可知, 岩石剪切破碎面首先出现在倾角为 $\frac{\pi}{4} - \frac{\theta + \phi_1}{2}$ 的平面上。

当 $\theta + \phi_1 \leq \frac{\pi}{2}$ 时, 发生剪切破碎; 当 $\theta + \phi_1 > \frac{\pi}{2}$ 时, 岩石处于压缩状态, 不发生跃进式侵入。

将式(19)代入式(18), 整理可得:

深度之比为常数。

由式(6)和式(20)可得, $m > 1$ 时的侵入系数计算公式为:

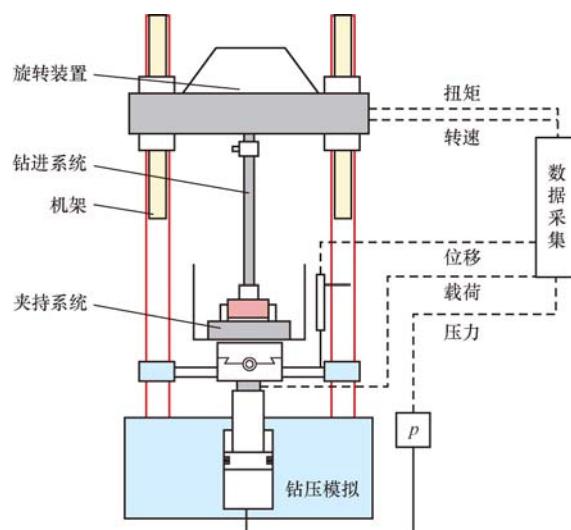


图2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

弹性模量9.80 GPa, 抗压强度72.62 MPa, 内聚力为8.13 MPa, 内摩擦角为23°。试样的尺寸根据试

验需要来确定, 试验前用砂轮将试样测试表面磨平。

3.2 试验结果及分析

在刃尖角为 10° 、水平应力为 25.4 MPa、液柱压力 11.5 MPa 和孔隙压力 10 MPa 条件下, 绘制了侵入系数与内摩擦角的理论曲线(见图 3)。由图 3 可知, 不同 b 值下的侵入系数随内摩擦角呈指数增加。选取的 b 值不同计算所得的侵入系数值也不同, 且随着 b 值的增大而增大。这是因为不同的 b 值代表不同的强度理论。当 $b=0$ 时, 为 Mohr-Coulomb 强度理论, 处于强度理论的下限, 此时侵入系数小; 当 $b=1$ 时, 为双剪强度理论, 处于强度理论的上限, 此时侵入系数大。侵入系数越大, 说明牙齿侵入岩石难度越大, 也就是岩石抗侵入强度越大。内摩擦角相同时, 井底条件下 $b=0$ 时的侵入系数大于常压条件下 $b=1$ 时的侵入系数。这说明相同的轴向载荷时, 井底条件下侵入岩石的深度要明显小于常压条件, 即井底压力环境会大幅度降低牙轮钻头的机械钻速。

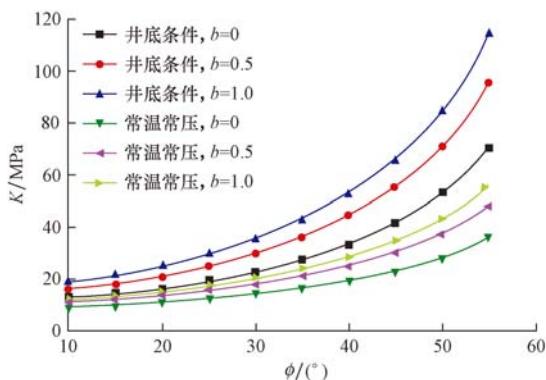


图 3 侵入系数随内摩擦角变化曲线

Fig. 3 Relationship between sinking coefficient and internal friction angle

为了弄清井底压力环境对侵入系数的影响, 在刃尖角为 10° 、水平应力为 25.4 MPa 条件下, 测试了液柱压力、孔隙压力与侵入系数的关系曲线(见图 4 和图 5)。图中 $b=0$, $b=0.5$ 和 $b=1.0$ 为理论计算结果, 试验值为试验条件下测得的关系曲线。

图 4 表明, 随着井眼内的液柱压力增大, 侵入系数增大, 牙齿侵入深度减小。这与实际钻井情况相符。当液柱压力增大, 井底岩石压持效应明显, 岩石强度提高, 机械钻速明显下降。由有效应力原理可知, 孔隙压力增大, 则骨架应力降低, 岩石压实程度降低会提高牙轮钻头的破岩效率, 提高机械钻速。图 5 的理论分析结果和试验值都与实际情况相符。

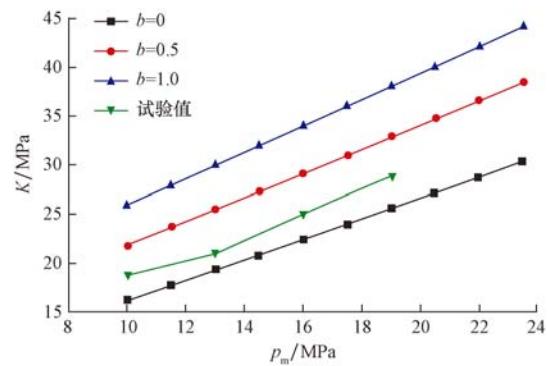


图 4 侵入系数随液柱压力变化曲线

Fig. 4 Relationship between sinking coefficient and fluid column pressure

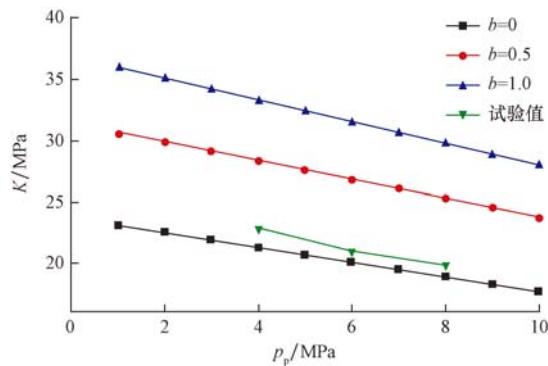


图 5 侵入系数随孔隙压力变化曲线

Fig. 5 Relationship between sinking coefficient and pore pressure

当 $b=0$ 时, 所得的理论侵入系数值最小; 当 $b=1$ 时, 所得的理论值最大。图 4 和图 5 中的试验值接近、但略高于 $b=0$ 时的侵入系数理论值。

在常温常压和井底条件下进行了单齿侵入试验, 结果见图 6 和图 7。

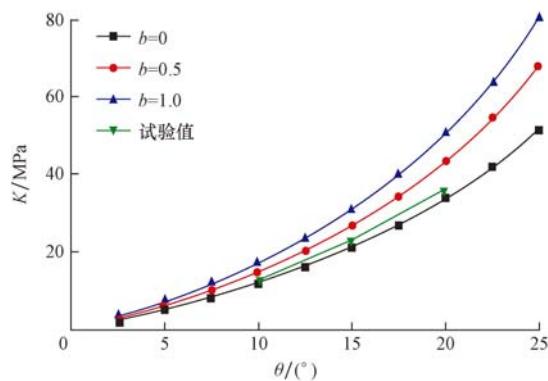


图 6 常温常压条件下侵入系数随刃尖角的变化曲线

Fig. 6 Relationship between sinking coefficient and blade angle under normal conditions

从图 6 和图 7 可以看出: 随着刃尖角的增大, 岩石的侵入系数呈指数增大规律; 井底压力条件下的

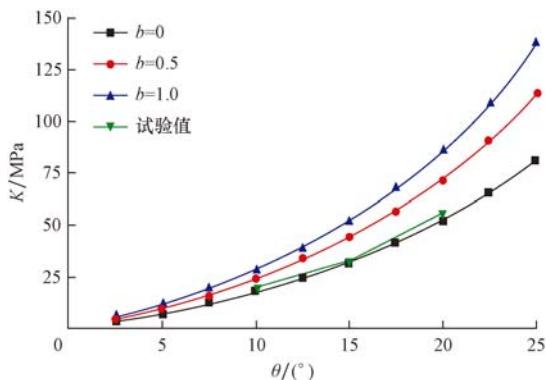


图 7 井底条件下侵入系数随刃尖角的变化曲线

Fig. 7 Relationship between sinking coefficient and blade angle under the condition of bottom hole

侵入系数要明显大于常压条件下相同刃尖角时的侵入系数。

4 结 论

- 1) 以统一强度理论为基础,考虑井底压力条件和中间主剪应力对侵入系数的影响,建立了含有统一强度参数的牙齿侵入井底岩石的侵入方程。
- 2) 侵入系数不受轴向载荷、侵入深度等参数的影响,是描述井底岩石抗侵入能力的重要指标。
- 3) 以侵入系数公式为理论依据,分析了岩石内摩擦角、液柱压力、孔隙压力和刃尖角对侵入系数的影响。

参 考 文 献

References

- [1] 赖海辉,朱成忠,李夕兵,等. 机械岩石破碎学[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1991:1-15.
Lai Haihui, Zhu Chengzhong, Li Xibing, et al. Mechanical rock fragmentation [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1991:1-15.
- [2] 徐小荷,余静. 岩石破碎学[M]. 北京:煤炭工业出版社,1984:108-115.
Xu Xiaohe, Yu Jing. Rock fragmentation [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984:108-115.
- [3] 王清峰,朱才朝,宋朝省,等. 牙轮钻头单牙轮的破岩仿真研究[J]. 振动与冲击,2010,29(10):108-112.
Wang Qingfeng, Zhu Caichao, Song Chaosheng, et al. Non-linear dynamic analysis of a roller cone bit-well rock system with rock-cone bit interaction[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(10):108-112.
- [4] 胡琴,刘清友. 复合齿形牙轮钻头及其破岩机理研究[J]. 天然气工业,2006,26(4):77-79.
Hu Qin, Liu Qingyou. Study on cone bit with composite tooth and its breaking mechanism[J]. Natural Gas Industry, 2006,26(4):77-79.
- [5] 闫铁,李伟,毕雪亮,等. 旋转钻井中岩石破碎能耗的分形分析[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增刊2):3649-3654.
Yan Tie, Li Wei, Bi Xueliang, et al. Fractal analysis of energy consumption of rock fragmentation in rotary drilling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (supplement 2):3649-3654.
- [6] 杨进. 岩石抗钻强度与地层孔隙压力关系模型及其应用[J]. 石油大学学报:自然科学版,2001,25(2):1-5.
Yang Jin. Correlation model of rock strength and formation pore pressure and application of the mode[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2001,25(2):1-5.
- [7] 刘永贵,王洪英. 徐深气田气体钻井破岩机理的初步研究[J]. 石油学报,2008,29(5):773-776.
Liu Yonggui, Wang Hongying. Initial research on rock breaking mechanism for gas drilling in Xushen Gas Field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008,29(5):773-776.
- [8] 赵伏军,李夕兵,冯涛,等. 动静载荷耦合作用下岩石破碎理论分析及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(8):1315-1319.
Zhao Fujun, Li Xibing, Feng Tao, et al. Theoretical analysis and experiments of rock fragmentation under coupling dynamic and static loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(8):1315-1319.
- [9] 郑德帅,冯江鹏. 井底压力对岩石破碎的影响机制及应用研究[J]. 岩土力学,2011,32(1):205-208.
Zheng Deshuai, Feng Jiangpeng. Mechanism of effect of down-hole pressures on rock failure and its applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(1):205-208.
- [10] 寇绍全,张宗贤,愈洁. 压头侵入引起的岩石断裂[J]. 岩石力学与工程学报,1989,18(4):275-285.
Kou Shaoquan, Zhang Zongxian, Yu Jie. Rock fracture under indentation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1989,18(4):275-285.
- [11] 俞茂宏. 强度理论新体系[M]. 西安:西安交通大学出版社,1992:249-289.
Yu Maohong. New system of strength theory [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1992:249-289.
- [12] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,1998:32-41.
Yu Maohong. Twin shear theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 1998:32-41.
- [13] 蒋明镜,沈珠江. 岩土类软化材料的柱形孔扩张统一解问题[J]. 岩土力学,1996,17(1):1-8.
Jiang Mingjing, Shen Zhujiang. Unified solution to expansion of cylindrical cavity for geomaterials with strain-softening behaviour[J]. Rock and Soil Mechanics, 1996,17(1):1-8.
- [14] 李杭州,廖红建,盛谦. 基于统一强度理论的软岩损伤统计本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(7):1331-1336.
Li Hangzhou, Liao Hongjian, Sheng Qian. Study on statistical damage constitutive model of soft rock based on unified strength theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(7):1331-1336.
- [15] 马国伟,俞茂宏,岩崎秀吉,等. 旋转盘和圆柱体的统一弹塑性解[J]. 工程力学,1995,41A:79-85.
Ma Guowei, Yu Maohong, Iwasaki Shoji, et al. Unified elasto-plastic solution to rotating disc and cylinder[J]. Journal of Structural Engineering, 1995,41A:79-85.

[编辑 滕春鸣]